

8. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей: справочник. – М.: Наука, 1972. – 720 с.
9. Енохович А. С. Справочник по физике: справочник. – М.: Просвещение, 1990. – 384 с.
10. Гречко А. В., Нестеренко Р. Д., Кудинов Ю. А. Практика физического моделирования на металлургическом заводе. – М.: Металлургия, 1976. – 224 с.
11. Максимов Ю. М., Рожков И. М., Саакян М. А. Математическое моделирование металлургических процессов. – М.: Металлургия, 1976. – 288 с.
12. Гухман А. А. Введение в теорию подобия. – М.: Высшая школа, 1973. – 295 с.
13. Алабужев П. М., Геронимус В. Б., Минкевич Л. М., Шеховцов Б. А. Теория подобия и размерностей. Моделирование. – М.: Высшая школа, 1968. – 206 с.
14. Крейт Ф., Блэк У. Основы теплопередачи. – М.: Мир, 1983. – 512 с.

УДК 669.045

Ю. А. Гичев, О. В. Переверзева

Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск, Украина

ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ КОНВЕРТЕРОВ

Аннотация

Рассмотрены два варианта размещения реактора-восстановителя на газоотводящем тракте конвертера. Размещение реактора на высокотемпературном газе позволяет одновременно с использованием восстановительного потенциала газа утилизировать его физическую теплоту. При использовании охлажденного газа возникает проблема нагрева газа перед подачей его в реактор, что осуществляется путем частичного сжигания газа.

В результате оценки восстановительной способности газа установлено, что для получения высокометаллизованного продукта газ следует подавать в реактор-восстановитель в течение нескольких продувок конвертера, образующих цикл восстановления. При этом процесс восстановления синхронизирован с выплавкой стали. Установлено также, что использование высокотемпературного газа в 2–3 раза эффективнее по сравнению с использованием охлажденного газа, но вместе с этим использование газа в качестве восстановителя как до, так и после газоочистки, вполне целесообразно. По степени использования СО восстановление конвертерным газом не уступает другим известным технологиям прямого получения железа.

Ключевые слова: конвертерный газ, железорудное сырье, металлизация, реактор-восстановитель, продувка.

Abstract

Two variants of placing the reactor on a reducing gas exhaust path converter. Placing high-temperature gas reactor allows simultaneous reduction potential using gas recycle its physical

warmth. When using the cooled gas is a problem of heating gas before feeding it into the reactor, which is carried out by the partial combustion of the gas.

The assessment of the resilience of gas found that for product gas should be fed to the reactor, the reducing agent for several purges converter forming the cycle of recovery. The process of recovery is synchronized with steel production. It was also found that the use of high-temperature gas is 2–3 times more effective than using a cooled gas, but together, the use of gas as a reducing agent, both before and after scrubbing, it is appropriate. According to the degree of recovery of CO BOF gas is not inferior to other known techniques, the direct production of iron.

Keywords: converter gas, iron ore, metal, reactor-reduction, purging.

В задачу данной работы входили: оценка восстановительной способности конвертерного газа и разработка основных положений технологии восстановления железорудного сырья конвертерным газом: характер и продолжительность процесса, ожидаемый выход металлизированного продукта, степень использования CO конвертерного газа и предпочтительные температуры восстановления.

В период выхода газа из конвертера содержание оксида углерода в нем изменяется. При этом характерными являются (рис. 1):

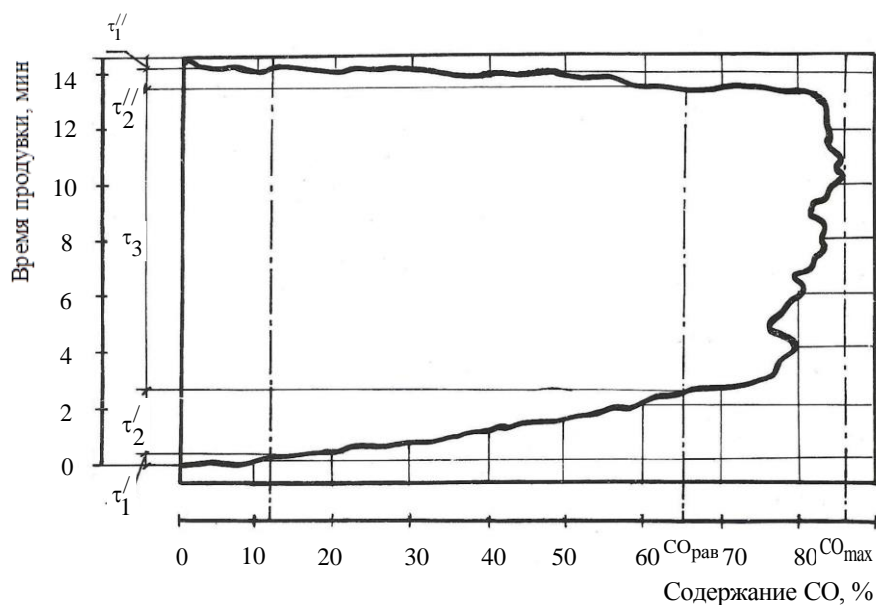


Рис. 1. Диаграмма изменения концентрации CO в газе во время продувки:

$\tau_1 = \tau_1' + \tau_1''$ – период выхода газа с содержанием CO ниже предела воспламенения; $\tau_2 = \tau_2' + \tau_2''$ – период выхода газа с содержанием CO выше предела воспламенения, но ниже равновесного для реакции $FeO \rightarrow Fe$;
 τ_3 – период использования газа для восстановления

- увеличение концентрации CO в начальный период продувки конвертера от 0 до максимума;

- стабилизация концентрации СО на максимальном уровне во время развитого процесса обезуглероживания металла;
- снижение концентрации СО от максимума до 0 в конце продувки.

Изменение концентрации СО не позволяет использовать газ для металлизации сырья в течение всего периода продувки. Из диаграммы на рис. 1 видно, что в начале и в конце продувки содержание СО не может обеспечить высокой степени восстановления, а при наличии ранее металлизированного сырья может вызвать его окисление. Поэтому конвертерный газ следует направлять на металлизацию сырья только в тот период продувки конвертеров, когда соотношение $\text{CO}/(\text{CO}+\text{CO}_2)$ в газе больше равновесного для реакции восстановления на ступени $\text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$. При этом для ликвидации выбросов СО с негорючим конвертерным газом необходимо также учесть использование газа, содержание СО в котором ниже предела воспламенения [2].

По месту размещения системы возможны два варианта, предусматривающие использование высокотемпературного газа, отбираемого за ОКГ, или охлажденного газа, отбираемого после газоочистки. Первый вариант позволяет использовать не только СО, но и физическую теплоту газа. При этом система располагается в цехе вблизи от конвертера, что упрощает подачу в него металлизированного продукта.

Поскольку размещение системы непосредственно в цехе не всегда предоставляется возможным, предусматривается второй вариант с размещением системы вне цеха при использовании газа после газоочистки. Сложность использования охлажденного газа после газоочистки состоит в необходимости подогревать его перед подачей в реактор-восстановитель, что достигается путем частичного сжигания газа.

Баланс времени выхода газа из конвертера можно представить в следующем виде:

$$\tau_{\text{пр}} = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3, \quad (1)$$

где $\tau_{\text{пр}}$ – продолжительность продувки конвертера; τ_1 , τ_2 , τ_3 – продолжительность соответствующих периодов (см. рис. 1).

Время использования газа для металлизации сырья (τ_3) определялось равновесной концентрацией СО при заданной температуре восстановления или вычислялось из уравнения (1):

$$\tau_3 = \tau_{\text{пр}} - (\tau_1 + \tau_2). \quad (2)$$

В варианте с охлажденным газом исходные концентрации СО для восстановления, соответствующие равновесным концентрациям после частичного сжигания газа, определялись расчетным путем.

Результаты расчета баланса времени выхода газа из конвертера иллюстрируются графиками, приведенными на рис. 2.

В варианте с высокотемпературным газом период использования газа для металлизации сырья составляет основную часть времени выхода газа из конвертера (75,0 – 82,5 %) и незначительно снижается с повышением температуры восстановления. В варианте с охлажденным газом повышение температуры восстановления резко снижает время возможного использования газа. Практически независимо от вида окислителя, применяемого для частичного сжигания газа, восстановление охлажденным газом целесообразно при температурах не выше 700–800 °С.

Отношение $\text{CO}/(\text{CO}+\text{CO}_2)$ не дает достаточно полного представления о восстановительной способности газа, так как указывает только на термодинамическую возможность процесса восстановления. Для более полной оценки необходимо знать скорость или время восстановления. В данном случае для этого целесообразно использовать известные расчетные зависимости.

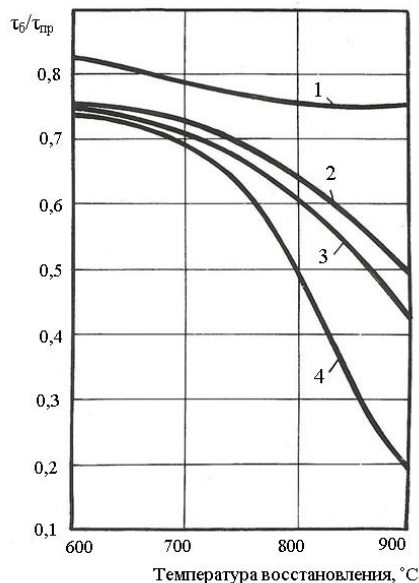


Рис. 2. Зависимость отношения $\tau_3/\tau_{пр}$ от температуры восстановления:

1 — при использовании высокотемпературного газа; 2, 3, 4 — при использовании охлажденного газа после частичного сжигания кислородом и воздухом соответственно с температурой 500 °C и 20 °C

Выбор формулы для расчета времени восстановления представляет определенную сложность и требует учета конкретных условий процесса. В работе [3] отмечается хорошее совпадение экспериментальных данных с результатами расчета по формуле Мак Кевана [4]:

$$\tau_B = \frac{\rho_K \cdot r}{k} \cdot \left[1 - (1 - \Phi_K)^{1/3} \right], \quad (3)$$

где ρ_K — кажущаяся плотность частицы восстанавливаемого сырья; r — радиус частицы; k — константа скорости реакции; Φ_K — степень восстановления по кислороду.

Приведенная формула получена для кинетического режима восстановления железорудных окатышей при температуре 400–1000 °C, что вполне удовлетворяет условиям рассматриваемого процесса.

Расчет времени восстановления по формуле (3) выполнен для железорудных окатышей со средним диаметром 16 мм при температуре 600–1000 °C. Константа скорости реакции определялась выражением:

$$k = k_0 \cdot \exp\left(-\frac{E}{R \cdot T_B}\right), \quad (4)$$

где k_0 – постоянная, характеризующая природу твердого материала и газа-восстановителя; E – энергия активации при восстановлении оксидом углерода; R – газовая постоянная; T_v – температура восстановления.

Величина постоянной k_0 принята по экспериментальным данным [5], в которых она была получена при восстановлении железорудных окатышей оксидом углерода. Тормозящее действие на реакцию восстановления диоксида углерода и азота также учитывалось по экспериментальным данным.

Степень восстановления по кислороду пересчитывалась на степень металлизации по формуле:

$$\varphi_{\text{мет}} = \frac{\varphi_{\text{к}} - 0,333}{0,667}. \quad (5)$$

Количество продувок, необходимых для восстановления сырья до заданной степени металлизации, определялось отношением:

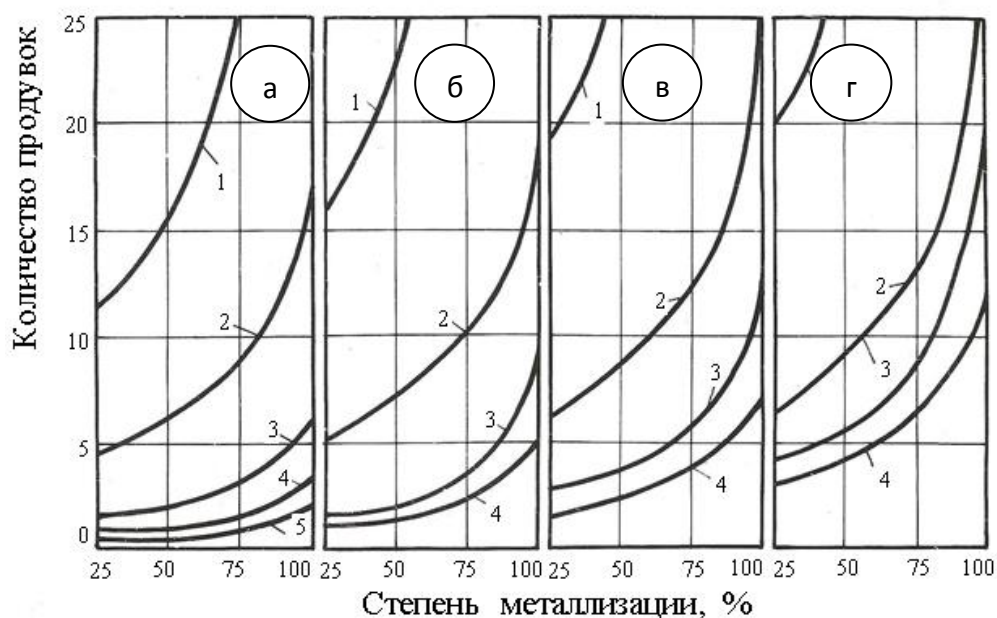


Рис. 3. Зависимость времени восстановления (количества продувок) от степени металлизации сырья при использовании высокотемпературного конвертерного газа – *а* и охлажденного газа после частичного сжигания кислородом – *б* и воздухом с температурой 500 °С – *в* и 20 °С – *г*:
1 – температура восстановления 600 °С; 2 – 700 °С; 3 – 800 °С; 4 – 900 °С; 5 – 1000 °С

$$n = \frac{\tau_v}{\tau_3}. \quad (6)$$

Результаты расчета времени восстановления конвертерным газом, приведенные на рис. 3, показывают, что для получения высокометаллизированного продукта необходимо использовать газ в течение нескольких продувок конвертера. Продолжительность цикла при использовании охлажденного газа в 2–3 раза больше, чем при использовании высокотемпературного газа, причем в обоих вариантах количество продувок при температуре ниже 700 °С резко возрастает.

Принимая во внимание ограничение температуры восстановления по термодинамическим признакам, можно сделать заключение о приемлемых интервалах температур восстановления конвертерным газом.

Восстановление высокотемпературным конвертерным газом реально в пределах $700\div 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, причем верхний предел ограничивается температурой начала образования жидкой фазы. Восстановление охлажденным газом целесообразно при температурах $700\text{--}800\text{ }^{\circ}\text{C}$. Здесь верхний предел ограничивается сокращением времени использования газа для металлизации сырья τ_3 (см. рис. 2).

По аналогии с балансом времени (1), баланс расхода газа можно представить в следующем виде:

$$V_{\text{пр}} = V_1 + V_2 + V_3, \quad (7)$$

где $V_{\text{пр}}$ – количество газа, отводимого из конвертера за продувку; V_1, V_2, V_3 – объемы выходящего газа в соответствующие периоды работы системы.

Пример и результаты расчета баланса расхода конвертерного газа приведены на рис. 4.

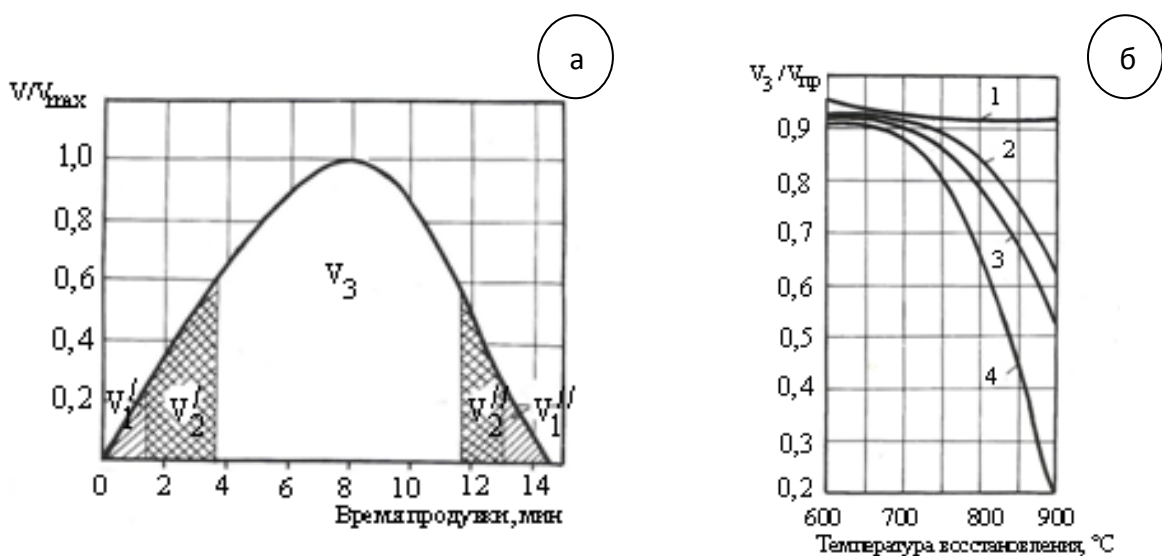


Рис. 4. Вычисление баланса конвертерного газа – а и зависимость отношения

$V_3/V_{\text{пр}}$ от температуры восстановления – б: $V_1 = V_1' + V_1''$ – объем газа

с содержанием CO ниже предела воспламенения; $V_2 = V_2' + V_2''$ – объем сжигаемого газа;

V_3 – объем газа, используемого для металлизации сырья; 1 – при использовании высокотемпературного газа; 2, 3, 4 – при использовании охлажденного газа после частичного сжигания кислородом и воздухом соответственно с температурой $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Доли газа (v_1, v_2, v_3), приходящиеся на отдельные периоды работы системы, вычислены из отношений:

$$v_1 = \frac{S_1}{S}, \quad v_2 = \frac{S_2}{S}, \quad v_3 = \frac{S_3}{S}, \quad (8), (9), (10)$$

где S, S_1, S_2, S_3 – соответствующие площади на графике изменения расхода газа (см. рис. 4, а).

Из результатов расчета (см. рис. 4, б) следует, что при использовании высокотемпературного газа расход его на металлизацию сырья составляет более 90 % от общего выхода газа и практически не зависит от температуры восстановления, а вариант с охлажденным газом позволяет использовать значительную часть газа для металлизации только при температуре восстановления до 800 °С.

Выход металлизированного продукта определялся выражением:

$$m_{\text{мет}} = \frac{v_3 \cdot K_v}{v_{\text{мет}}} \left(CO'_{\text{ср3}} - CO_p \right), \quad (11)$$

где K_v – коэффициент, учитывающий увеличение объема газа после частичного сжигания (при использовании высокотемпературного газа $K_v=1$); $CO'_{\text{ср3}}$ – среднее содержание оксида углерода в газе, отводимом на металлизацию; CO_p – равновесная концентрация оксида углерода в газе для заданной температуры восстановления; $v_{\text{мет}}$ – удельный расход оксида углерода на восстановление железорудного сырья до заданной степени металлизации.

Степень использования CO определялась удельным выходом металлизированного продукта по остатку CO в газе после восстановления:

$$CO''_{\text{ср3}} = CO_p - \frac{m_{\text{мет}} \cdot v_{\text{FeO}}}{v_3 \cdot K_v}, \quad (12)$$

где v_{FeO} – удельный расход оксида углерода на восстановление сырья от Fe_2O_3 до FeO.

Степень использования CO определялась соотношением:

$$\eta_{\text{CO}} = \frac{CO'_{\text{ср3}} - CO''_{\text{ср3}}}{CO'_{\text{ср3}}}. \quad (13)$$

Выход металлизированного продукта и степень использования CO в зависимости от степени металлизации сырья (при температурах восстановления 700 ÷ 800 °С) приведены на рис. 5.

Степень использования CO (см. рис. 5, б) в варианте с высокотемпературным газом при получении высокометаллизированного продукта составляет более 30 %, что соответствует показателям прямого получения железа с применением других технологий. Для охлажденного газа степень использования CO на восстановление составляет до 20 %, но с учетом расхода газа на получение высокотемпературной смеси показатель использования CO возрастает на 10–15 %.

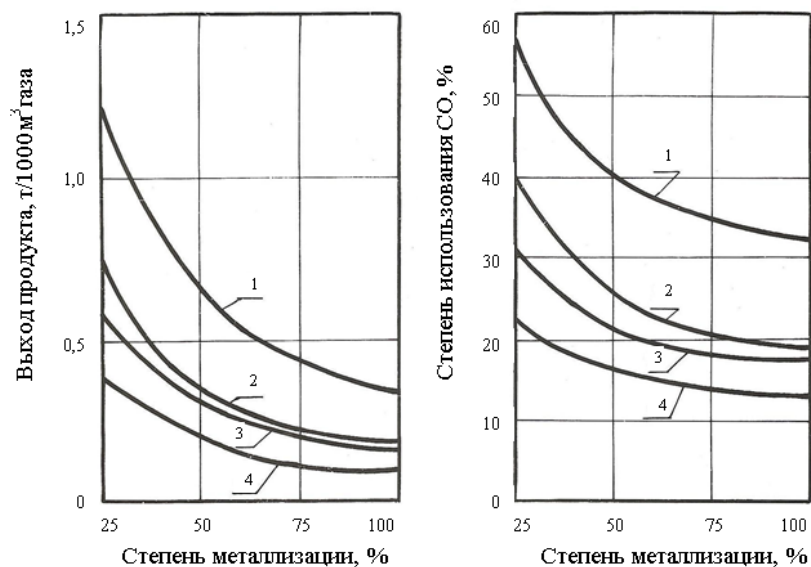


Рис. 5. Зависимости выхода металлизированного продукта – *а* и степени использования СО – *б* от степени металлизации железорудного сырья:
1 – при использовании высокотемпературного газа; 2, 3, 4 – при использовании охлажденного газа после частичного сжигания кислородом и воздухом соответственно с температурой 500 °С и 20 °С

Список использованных источников

1. Гичев Ю. А. Взгляд на проблему использования отходящих газов сталеплавильных конвертеров // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2004. – №2 (8). – С. 30–36.
2. Гичев Ю. А. Возможность сокращения выбросов СО в атмосферу при кислородно-конвертерном производстве стали // Экология и промышленность. – 2006. – №3. – С. 41–52.
3. Князев В. Ф., Гиммельфарб А. И., Неменов А. М. Бескоксовая металлургия железа. – М.: Металлургия, 1972. – 272 с.
4. Mc. Kewan W.U. // Trans. Metallurg. Soc. AJME. – 1962. – Vol. 224, №2. – P. 387–393.
5. Тепло- и массообмен в плотном слое / Б. И. Китаев, В. Н. Тимофеев, Б. А. Боковиков и др. – М.: Металлургия, 1972. – 432 с.